

УДК 621.891

А.Г. Кузьменко, проф., д-р техн. наук, С.В. Ситнік, асист.
Хмельницький національний університет

Расчет и повышение износостойкости шаровых шарниров рулевого управления транспортных машин

Предложен обобщенный метод на износ тел двоякой кривизны с определением параметров модели изнашивания. Метод использован для расчета износа шаровых опор рулевого управления автомобиля. При этом решена задача о взаимодействии шарового пальца и полимерного вкладыша. Исследованы параметры модели износа пары сталь-полиуретан по схеме цилиндр – сфера, выполнен расчет износа шаровых шарниров рулевого управления автомобиля.

пары трения, износ, методы модельного испытания, шаровые шарниры

Постановка задачи. В подавляющем большинстве случаев машины выходят из строя вследствие износа деталей и агрегатов. Повышение износостойкости поверхностей достигается как путем совершенствования материалов деталей, так и путем создания новых видов смазочных материалов.

Как в одном, так и в другом случаях процесс совершенствования узла проходит: 1) стадию разработки мероприятий совершенствования узла; 2) стадию исследований эффективности предложенных технологий и мероприятий. В основе исследований износостойкости лежат модельные испытания на износ с последующим прогнозированием поведения машин в эксплуатации. Процесс прогнозирования требует построения моделей поведения узлов в реальных условиях, то есть расчетно-экспериментальной оценки износа и надежности. Несмотря на определенные успехи методы расчетов узлов трения на износ явно отстают от требований техники и не соответствуют современным требованиям. Достаточно сравнить развитие методов расчета на прочность с методами расчета на износ, чтобы убедиться в явном отставании последних.

Одна из базовых причин такого состояния состоит в отсутствии параметров моделей изнашивания для разных пар трения. Сведения об этих параметрах носят случайный, эпизодический характер. Параметры моделей изнашивания отсутствуют, главным образом, из-за несовершенства методов модельных испытаний пар трения.

Существующие испытания длительны, дорогостоящи и имеют большой методический разброс данных. В то же время пар трения, которые необходимо испытывать необозримо много.

В связи с этим задача создания принципиально новых методов модельных испытаний пар трения на износ с эффективным определением параметров моделей изнашивания представляется в настоящее время чрезвычайно актуальной. На основе анализа состояния проблемы в данной работе были поставлены следующие задачи исследования:

а) разработать теоретические основы метода, включающие: решение прямых контактных задач для шара, изнашивающегося в установившемся режиме; решение

обратных контактных задач для шара с износом в тех же режимах с получением формул для определения параметров моделей изнашивания при заданном износе;

б) отработать методики, установки и технику экспериментальной реализации методов испытаний и обработки результатов с получением параметров моделей изнашивания;

в) показать практику использования метода для решения конкретных задач эффективной количественной оценки износостойкости пар трения из разных материалов;

г) показать эффективность практического использования предложенного метода для расчетно-экспериментальной оценки износа при разной смазке шаровых шарниров рулевого управления автомобиля типа ВАЗ.

2. Теоретические основы метода испытаний на износ. Идея метода состоит в использовании при испытаниях образцов с изменяющейся (увеличивающейся) площадкой контакта и соответственно изменяющимися (уменьшающимися) контактными давлениями. Процесс изнашивания при изменяющихся размерах площадки содержит скрытую информацию о зависимости износа от давления, т.е. информацию об основной модели изнашивания. Сделать информацию явной можно только составив и решив дифференциальное уравнение процесса. Решению этой задачи и посвящены исследования второго раздела.

1. Сначала ставится и решается прямая и контактная задача для шара и плоскости с износом. В прямой задаче параметры модели изнашивания задаются, а давление и размеры площадки контакта определяются из решения.

Постановка контактной задачи с износом складывается из трех соотношений:

а) дифференциального соотношения модели установившегося изнашивания

$$\frac{du_{w1}}{ds_1} = k_{w1} \sigma^{m_1}; \quad (1)$$

б) условия сплошности в контакте

$$u_{w1}(s_1, r) = u(s_1, r); \quad (2)$$

в) условия равновесия в контакте

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^a \sigma(s_1, r) r dr d\varphi, \quad (3)$$

где $u_{w1}(s_1, r)$ - линейный износ шара;

s_1 - путь трения для контактных точек шара;

$\sigma(s_1, r)$ - контактное давление по площадке контакта;

r, φ - радиальные и угловые координаты;

k_{w1}, m_1 - параметры модели изнашивания;

$u(s_1, r)$ - геометрическая функция в контакте;

Q - нагрузка на шар,

$$u(s_1, r) = \frac{a^2(s_1) - r^2}{2R}. \quad (4)$$

В такой постановке контактная задача сводится к дифференциальному уравнению

$$\sigma(s_1) = \left[\frac{a(s_1) da(s_1)}{k_{w1} R ds_1} \right]^{1/m_1}, \quad (5)$$

из которого следует, что контактные давления, в условиях принятых допущений, распределены по площадке контакта равномерно. Дальнейшее рассмотрение приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными относительно радиуса a площадки контакта

$$Q = \pi a^2(s_1) \left[\frac{a(s_1) da(s_1)}{k_{w1} R ds_1} \right]^{1/m_1}. \quad (6)$$

Решая уравнение получаем зависимость для определения площадки контакта

$$a(s_1) = \left[(2m_1 + 2) \left(\frac{k_{w1} R}{\pi^{m_1}} Q^{m_1} s_1 + c \right) \right]^{1/2m_1+2}. \quad (7)$$

Постоянная интегрирования при нулевой начальной площадке контакта равна нулю $c = 0$, а при $a(s_1 = 0) = a_0, c = a_0^{2m_1+2}$.

2. Обратная контактная задача с износом состоит в определении параметров k_w, m модели изнашивания при заданной (известной из эксперимента) зависимости размера площадки контакта $a(s)$ от пути трения.

Решение обратной задачи можно выполнить методом обращения решения прямой задачи (7) для случая нулевой начальной площадки контакта на экспериментальной кривой $a(s)$ задаются две точки, $(a_1, s_1); (a_2, s_2)$ для которых записывается решение (7). Решая эту систему из двух уравнений, получаем искомые зависимости для определения параметров k_w, m :

$$m_1 = \frac{\lg s_1/s_2}{2 \lg a_1/a_2} - 1, \quad (8)$$

$$k_{w1} = \frac{a_1^{2m_1+1}}{(2m_1 + 2) R (Q/\pi)^{m_1} s}. \quad (9)$$

3. Эффективным оказалось обобщение метода предложенного для испытаний шара и плоскости на испытания любых тел двойкой кривизны. Приведенный (эквивалентный контакту шара и плоскости) радиус для контакта тел двойкой кривизны был получен из условия равенства в обоих случаях площади площадки контакта и максимального радиального износа.

Формула для приведенного радиуса R_* имеет вид

$$R_* = (R_1^* R_2^*)^{1/2}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{21}}; \frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{22}}. \quad (11)$$

С учетом этих соотношений, если проведены испытания на износ пары трения с телами двоякой кривизны и получена зависимость типа (11) $a = cs^\beta$, где

$$a = (a_1 a_2), \quad (12)$$

где a_1, a_2 – полуоси эллиптической площадки контакта, то параметры модели изнашивания k_w, m определяются по зависимостям (14) и (9), в которой радиус R заменен на R_* по (16).

4. Исследование износа шаровых шарниров.

Разработана методика расчетно-экспериментальной оценки износа шаровых шарниров рулевого управления. Для примера реализована применительно к шаровым шарнирам рулевого управления автомобиля ВАЗ.

1. Из анализа конструкции ШО РУА ВАЗ следует: во-первых, высокая ответственность узла и необходимость прогнозировать его расчет; во-вторых, недостаточно высокая надежность.

В соответствии с общей схемой расчетно-экспериментальной оценки износа узлов трения на первом этапе выполнен силовой и кинематический анализ ШО РУА и принять в качестве базовой нагрузки 100 кгс на шарнир при пути трения в шарнире за цикл 3,5 мм.

Для определения контактных давлений в начальный момент эксплуатации выполнено решение задачи о контактном взаимодействии жесткого шара и упругого сферического вкладыша в жесткой сферической обойме. Зависимость максимального контактного давления на вкладыш получена в виде

$$\sigma_0 = \frac{Q}{2\pi R^2 (1 - \cos^2 \varphi_0)}, \quad (13)$$

где φ_0 – половина угла контакта;

R – радиус сферы.

2. Параметры модели изнашивания пары трения сталь-полиуретан шарового шарнира РУ ВАЗ определялись при испытаниях по схеме шар-цилиндр на установке ТЭТ-09/2 по методике п.3.1. в 1 кгс, при $n = 830$ об/мин. Испытания проводились при трех видах смазки: 1) серийное ШРБ; 2) Mobil; 3) Shell; 4) без смазки.*)

Результаты испытаний представлены в табл.3. В этой же таблице приведены величины интенсивности износа полиуретана в заданных базовых условиях. Из рассмотрения результатов следует, что отсутствие смазки увеличивает износ шарнира в 14 раз; износ при смазке Mobil составляет от серийного 0,79 – 0,54; при смазке Shell – 0,88 – 0,6.

3. На основе предыдущих исследований выполнена расчетная оценка износа шаровых шарниров при разных видах смазки. Результаты расчетной оценки износа шарниров приведены в табл.2. Результаты для серийного варианта удовлетворительно согласуются с эксплуатационными данными и дают представление об эффективности использования других смазок.

Таблица 1 - Результаты испытаний полиуретана с разными видами смазки

№	Путь трения 10^6 , мм	a , мм			
		Без смазки	ШРБ	Mobil	Shell
1	1	1,414	1,311	1,231	1,247
2	3	1,55	1,49	1,35	1,34
3	5	1,685	1,525	1,452	1,471
4	7,5	1,74	1,6	1,52	1,51
5	10	1,812	1,734	1,592	1,614
	β	0,1077	0,1214	0,1117	0,112
	c	0,3193	0,245	0,263	0,2654
	m	3,6425	3,1186	3,4763	
	k_w	$14 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$
	$\frac{du_w}{ds} \left(\sigma = 0,6 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right) \cdot 10^{-6}$	$\frac{2,1779}{26}$	$\frac{0,08335}{1}$	$\frac{0,066}{0,79}$	$\frac{0,0733}{0,88}$
	$\frac{du_w}{ds} \left(\sigma = 0,2 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \right) \cdot 10^{-6}$	$\frac{0,03982}{14,7}$	$\frac{0,0027}{1}$	$\frac{0,00145}{0,54}$	$\frac{0,00163}{0,6}$

Таблица 2 - Результаты расчетной оценки износа (в мм) полиуретанового вкладыша на 1000 км пути автомобиля

σ , кг / мм ²	Без смазки	Смазка ШРБ	Смазка Mobil	Смазка Shell
0,6	1,612	0,062	0,049	0,054
0,2	0,053	0,002	0,001	0,0012

3. Обобщение результатов и выводы 1. Разработан, реализован, использован на практике принципиально новый метод модельных лабораторных испытаний пар трения на износ с эффективным определением параметров модели изнашивания. Принципиальное отличие разработанного метода от известных состоит в том, что испытания проводятся в условиях непрерывно увеличивающейся площадки контакта, то есть при уменьшающихся давлениях. Это дает возможность из математического описания процесса в принципе по испытаниям одного образца получить параметры модели изнашивания.

2. Теоретические основы метода модельных испытаний на износ базируются на следующих научных результатах. Решена задача о контактном взаимодействии с износом шара и плоскости. При определенных допущениях задача сведена к дифференциальному уравнению, из решения которого в прямой постановке получены формулы для расчета износа, а в обратной постановке получены параметры модели изнашивания.

В результате решения обратной задачи, полученные расчетные зависимости, которые позволяют при наличии экспериментальной зависимости площадки контакта от пути трения определить параметры модели изнашивания.

3. Путем введения понятия эквивалентного приведенного радиуса и использования критериального уравнения по теории подобия и размерностей метод испытаний на износ, предложенный для контакта шар-плоскость, обобщен на испытания на износ при контакте тел двоякой кривизны.

При этом метод испытаний по схеме перекрещивающихся цилиндров является частным случаем общего метода испытаний на износ по схеме контакта тел двоякой кривизны.

4. Разработана методика расчетно-экспериментальной оценки износа шаровых шарниров рулевого управления автомобиля:

- для определения условий работы шарниров решена задача о взаимодействии шарового пальца и полимерного вкладыша. Результаты решения использованы как исходные в расчетной оценке износа.

- параметры модели изнашивания пары сталь-полиуретан получены при испытаниях по схеме цилиндр-сфера по разработанной методике на созданной установке.

- выполнен расчет износа шаровых шарниров рулевого управления автомобиля ВАЗ и установлено, что отсутствие смазки повышает износ в 14 раз, а применение смазки Mobil снижает износ примерно в 2 раза в сравнении с износом при серийной смазке ШРБ.

Список литературы

1. Кузьменко А.Г. Жесткий контакт шара и плоскости с износом. Сообщение 1 / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник, Г.А. Кузьменко // Проблемы трибологии. – 1998. – №2(8). – С. 21 – 40.
2. Кузьменко А.Г. Жесткий контакт шара и плоскости с износом. Сообщение 2 / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник, Г.А. Кузьменко // Проблемы трибологии. – 1998. – №2(8). – С. 82 – 103.
3. Кузьменко А.Г. Жесткий контакт шара и плоскости с учетом износа. Неустановившийся износ / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник, Г.А. Кузьменко // Проблемы трибологии. – 1998. – №3(9). – С. 27 – 35.
4. Кузьменко А.Г. Методы испытания на износ по схеме шар-плоскость (методы ШАРП) / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник, Г.А. Кузьменко // Проблемы трибологии. – 1998. – №4(10). – С. 36 – 43.
5. Кузьменко А.Г. Методы испытаний на износ / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник // Проблемы трибологии. – 1999. – №2(12). – С.38 – 109.
6. Метод испытания на износ цилиндрических и сферических тел / [Кузьменко А.Г., Сытник С.В., Пселл С.В., Кузьменко Г.А.] // Проблемы трибологии. – 2002. – №1(23). – С. 105 – 128.
7. Кузьменко А.Г. Износ в шаровых опорах рулевого управления автомобиля (расчеты и испытания) / Кузьменко А.Г., Сытник С.В // Проблемы трибологии. – 2008. – №3. – С.94 – 120.

А. Кузьменко, С. Сытник

Розрахунок та підвищення зносостійкості шарових шарнірів рулевого управління транспортних машин

Запропонований узагальнений метод на знос тіл двоякої кривизни з визначенням параметрів моделі зношування. Метод використаний для розрахунку зносу кульових опор рулевого управління автомобіля. При цьому вирішена задача про взаємодію шарового пальця та полімерного вкладыша. Досліджені параметри моделі зносу пари сталь-поліуретан за схемою цилиндр-сфера, а також виконаний розрахунок зносу шарових параметрів рулевого управління автомобіля.

A. Kuzmenko, S. Sytnik

Accounts and increasing of wearing capacity ball and socket joint of steering control transport machines

Suggested the generalized method of wearing bodies by double curvature with the determination of parameters model wearing. The method was used with the accounting wearing spherical joint steering management by a car. During this the settled task about interconnection of a ball pin and polymeric insert. The

research parameters of the model wearing steam steel-polyurethane for the scheme of cylinder- sphere, and also done with the account of wearing flitting parameters steering management of a car.

Получено 17.09.09